

ПОСТРОЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 28-см ТЕЛЕСКОПА СКАС КФУ ПУТЕМ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДА И ЭКСТИНКЦИИ

И. Н. Никоноров, Р. Я. Жучков

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Данная работа посвящена нахождению уравнений перехода от фотометрической системы B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} телескопа ШК-280, установленного на СКАС КФУ, в стандартную B_J , V_J , R_C систему Джонсона—Казинса с применением современных численных методов. Были проведены наблюдения стандартов Ландольта поля SA110. Выполнена абсолютная фотометрия избранных звезд, оценена погрешность измерений. Построена модель перехода от заатмосферных звездных величин в стандартной системе к наблюдаемым инструментальным. С помощью метода Монте-Карло с марковскими цепями совместно определены средние за период наблюдений коэффициенты атмосферной экстинкции (0.276, 0.205, 0.159 для B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} соответственно) и коэффициенты уравнений перехода между системами (цветовые коэффициенты 0.165, -0.120 , -0.378 для B_J^0 , V_J^0 , R_C^0 в зависимости от $(B - G)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$ соответственно).

PHOTOMETRIC CALIBRATION OF 28-cm TELESCOPE OF NCAS KFU BY JOINTLY MODELING EQUATIONS OF TRANSFORMATIONS AND THE EXTINCTION

I. N. Nikonorov, R. Ya. Zhuchkov

Kazan (Volga region) Federal University

This work is devoted to study of transformations equations between B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} photometric system of 28-cm Schmidt-Cassegrain telescope mounted in NCAS KFU to standard Johnson—Cousins B_J , V_J , R_C using modern numerical methods. Observations of Landold Standards at the SA110 region were performed. Absolute photometry of selected stars was obtained with estimatiuon of observational errors. To transform the observational data into the standart system numerical model was built with the use of Markov Chain Monte Carlo sampling. So, we found average parameters of transformations between systems (color reduction coefficients are 0.165, -0.120 , -0.378 for B_J^0 , V_J^0 , R_C^0 in dependence of $(B - G)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$, $(G - R)_{instr}^0$ respectively) and medium extinction at the observational period (0.276, 0.205, 0.159 for B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} respectively).

Важнейшим этапом получения данных является переход к стандартным заатмосферным звездным величинам. При этом зачастую наличие стандартных $B_J V_J R_C$ -фильтров системы Джонсона—Казинса кажется панацеей. Но очевидно, что использование современных приемников с различной кривой реакции делает построение уравнений перехода необходимым этапом инструментальных калибровок. С другой стороны, при наличии квалифицированно проведенной редукции и полученных уравнениях перехода даже нестандартные фильтры могут давать точность после перевода в международную систему не хуже традиционно используемых.

Кроме того, в последнее время получило развитие множество численных методов, которые упрощают построение уравнений перехода и делают его методически более правильными. Таким образом, основной задачей данной работы было как построение уравнений перехода к стандартной фотометрической системе, так и отработка алгоритмов и написание

программы, применимой для калибровки подобных инструментов (в частности, РТТ-150 и телескопов АОЭ КФУ). Весь программный код в данной работе выполнен на языке Python с использованием подключаемых пакетов.

В качестве стандартной была выбрана система, построенная Ландольтом [1]. Она отлично зарекомендовала себя за десятки лет с момента первого построения, все ее систематические неточности хорошо изучены, кроме того, периодически проводятся новые наблюдения для корректировок. Звездные величины из инструментальной системы B_{instr} , G_{instr} , R_{instr} было решено переводить в B_J , V_J , R_C .

Проведены наблюдения части поля SA110 в июне—июле 2018 г. Были выбраны стандарты 496, 497, 499, 503, 504, 506, 507: они имеют заатмосферные звездные величины 14.2—11.3 в полосе V_J , показатели цвета $(B - V)_J^0$ (верхний индекс 0 в работе обозначает заатмосферную величину) в подходящем для построения системы диапазоне 0.56—1.25, во время наблюдений находились на воздушных массах 1.4—2.2. Атмосфера была достаточно прозрачной для осуществления абсолютной фотометрии 1, 5 и 7 июля, за эти ночи были получены 19 кадров в фильтре B_{instr} и по 20 в G_{instr} и R_{instr} с выдержками 120—180 с. SNR составило ≈ 80 —300.

Редукция проводилась в пакете `ccdproc` [2]. Проведены стандартные коррекции, также из-за гетерогенности фотометрических рядов все кадры были приведены к единицам электронов, пришедшим в пиксель матрицы за секунду; кроме того, найдены неопределенности значения в каждом из пикселей. Для регистрации смещений кадров относительно друг друга по ярким звездам был использован пакет `Astroalign` [3]. Осуществлена апертурная абсолютная фотометрия избранных звезд с помощью пакета `photutils` [4]. Погрешность суммы (S) внутри апертуры считалась по алгоритмам пакета. Звездная величина в инструментальной системе и ее погрешность определялись по формулам 1:

$$m_{instr} = -2.5 \lg(S), \quad \Delta m_{instr} = \frac{2.5}{\ln(10)} \frac{\Delta S}{S}, \quad [S] = \frac{e^-}{c}. \quad (1)$$

Ключевой частью модели являются уравнения перехода между фотометрическими системами. Они составлялись по ставшей классической работе Харди [5], их вид приведен в системе 2, все $C(=const)$ — параметры модели. Для модели использовался обратный переход, получаемый решением системы относительно B_{instr}^0 , G_{instr}^0 и R_{instr}^0 .

$$\begin{cases} B_J^0 &= B_{instr}^0 + C_B + C_{B,B-G} \cdot (B - G)_{instr}^0, \\ V_J^0 &= C_{instr}^0 + C_V + C_{V,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0, \\ R_C^0 &= R_{instr}^0 + C_R + C_{R,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0. \end{cases} \quad (2)$$

Атмосферная экстинкция учитывалась также в соответствии с работой [5]. Уравнения для нее — система 3, где $k(=const)$ — параметры модели; $X(z)$ — воздушная масса (была рассчитана на времена экспозиции с помощью пакета `Astropy` [6], [7]).

$$\begin{cases} B_{instr} &= B_{instr}^0 + [k_B + k_{B,B-G} \cdot (B - G)_{instr}^0] \cdot X(z), \\ G_{instr} &= G_{instr}^0 + [k_G + k_{G,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0] \cdot X(z), \\ R_{instr} &= R_{instr}^0 + [k_R + k_{R,G-R} \cdot (G - R)_{instr}^0] \cdot X(z). \end{cases} \quad (3)$$

Для оценки параметров модели как целого применены методы байесовской статистики. Их использование обусловлено легкостью поиска корреляции между параметрами модели и обоснованностью постановки задачи напрямую аксиомами вероятности. Параметры

C и k считались априори распределенными равномерно по фазовому пространству. Было учтено, что звездные величины и показатели цвета в системе Ландольта имеют некоторые случайные погрешности, указанные в статье [1]. Они были включены в параметры модели и считались априори распределенными нормально с известными дисперсиями и независимо. Функция правдоподобия также строилась в предположении, что невязки распределены нормально и независимо. За дисперсию их распределения полагались неопределенности, оцененные при абсолютной фотометрии. Прямое вычисление модели происходило с помощью класса моделирования, используемого в пакете george [8] (только из соображений удобства, гауссовский процесс в работе на данный момент не рассматривается), для семплинга плотности апостериорного распределения параметров в фазовом пространстве применялся афинно-инвариантный семплер emcee [9]. Из семплов апостериорного распределения путем маргинализации по звездным величинам и показателям цвета в стандартной системе получены оценки коэффициентов экстинкции и перехода (см. таблицу и рис. 1).

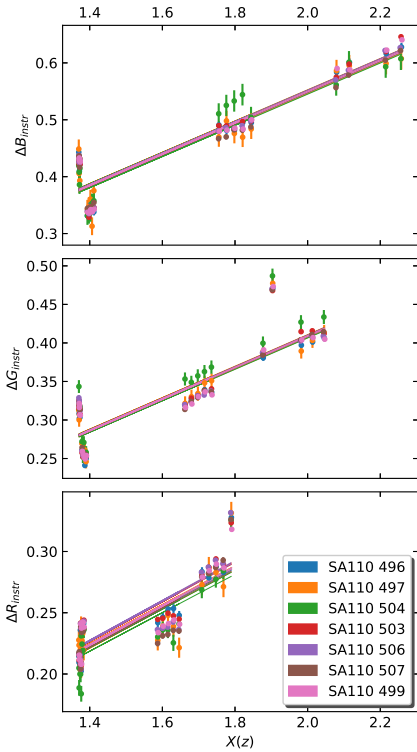


Рис. 1. Ослабления блеска избранных звезд в полосах инструментальной системы в зависимости от воздушной массы

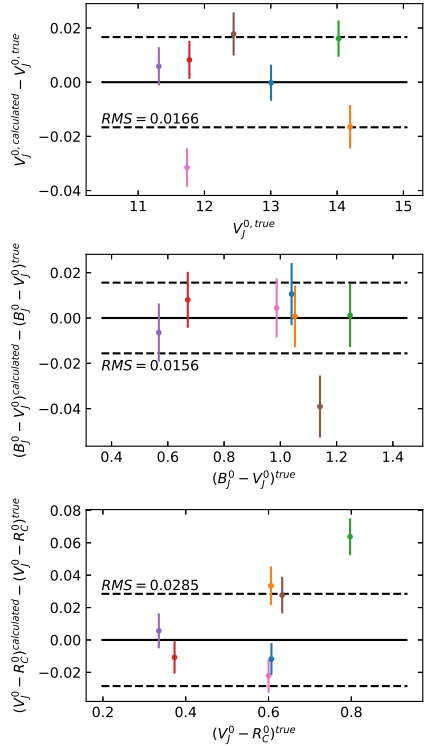


Рис. 2. Невязки перехода от B_{instr}^0 G_{instr}^0 R_{instr}^0 к B_J^0 V_J^0 R_C^0 в результате независимой подстановки в финальные уравнения перехода.

Примечание. Легенду см. на рис. 1

Также можно заметить, что экстинкция в фильтрах не зависит от цвета звезды в рассмотренных условиях с реализованной точностью.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
C_B	21.0612 ± 0.0056	k_B	0.2758 ± 0.0020
$C_{B,B-G}$	0.1651 ± 0.0130	$k_{B,B-G}$	-0.0037 ± 0.0051
C_V	20.7355 ± 0.0020	k_G	0.2049 ± 0.0012
$C_{V,G-R}$	-0.1199 ± 0.0123	$k_{G,G-R}$	0.0054 ± 0.0073
C_R	20.1309 ± 0.0038	k_R	0.1586 ± 0.0017
$C_{R,G-R}$	-0.3781 ± 0.0246	$k_{R,G-R}$	-0.0110 ± 0.0109

Путем независимой подстановки B_{instr}^0 , G_{instr}^0 , R_{instr}^0 избранных звезд в финальные уравнения перехода была выполнена проверка его линейности. Проверка показала, что уравнения линейны с заявленной точностью в указанном диапазоне цветов (невязки см. на рис. 2). Кроме того, поскольку обычно погрешность дифференциальной фотометрии на инструменте порядка нескольких сотых величины, можно утверждать, что использование полученных уравнений перехода не будет значительно влиять на ее результат.

Таким образом, несмотря на традиционное недоверие к фильтрам, отличным от стандартной системы пропускания, и распространенному тезису, что именно стандартные фильтры являются залогом существования стандартной фотометрической системы инструмента, использование близких по характеристикам полос пропускания при выполнении должной калибровки не снижает точности полученных данных.

Библиографические ссылки

- [1] *Landolt Arlo U.* UBVRI Photometric Standard Stars Around the Celestial Equator: Updates and Additions // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 137, № 5. — P. 4186–4269. 0904.0638.
- [2] *Craig M. W., Crawford S. M., Deil Christoph et al.* ccdproc: CCD data reduction software. — 2015. 1510.007.
- [3] *Beroiz M., Cabral J. B., Sanchez B.* Astroalign: A Python module for astronomical image registration // *Astronomy and Computing.* — 2020. — Vol. 32. — P. 100384.
- [4] *Bradley Larry, Sipőcz Brigitta, Robitaille Thomas et al.* astropy/photutils: 1.0.0. — 2020.
- [5] *Hardie Robert H.* Photoelectric Reductions, ed. by William A. Hiltner. — 1964. — P. 178.
- [6] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A community Python package for astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A33. 1307.6212.
- [7] *Astropy Collaboration, Price-Whelan A. M., SipHocz B. M. et al.* The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package // *Astron. J.* — 2018. — Vol. 156, № 3. — P. 123. 1801.02634.
- [8] *Ambikasaran S., Foreman-Mackey D., Greengard L. et al.* Fast Direct Methods for Gaussian Processes. — 2014.
- [9] *Foreman-Mackey Daniel, Hogg David W., Lang Dustin, Goodman Jonathan.* emcee: The MCMC Hammer // *Public. Astron. Soc. Pacific.* — 2013. — Vol. 125, № 925. — P. 306. 1202.3665.